

Untersuchungen zur Uranausscheidung im Urin

Überprüfung von Schutzmaßnahmen beim Deutschen Heereskontingent KFOR

**Forschungsbericht im Auftrag des
Bundesministeriums der Verteidigung**

P. Roth, E. Werner, H.G. Paretzke

***GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit,
Institut für Strahlenschutz,
Neuherberg***

**Januar 2001
GSF-Bericht 3 / 01**

*(Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und
muß nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen)*

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einleitung und Problemstellung	1
2.	Eigenschaften von abgereichertem Uran	2
3.	Stoffwechselverhalten von Uran	4
4.	Chemische und radiologische Toxizität von Uran	6
4.1	Chemische Toxizität	6
4.2	Radiotoxizität	7
5.	Renale Uran-Ausscheidung bei nicht-exponierten Personen	8
6.	Eingesetzte Meßverfahren	12
7.	Durchgeführte Arbeiten	14
7.1	Studiengruppen	14
7.2	Umweltproben	15
7.3	Ablauf der Untersuchungen	15
7.4	Durchführung der Messungen	15
8.	Ergebnisse	16
9.	Bewertung der Ergebnisse	23
10.	Zusammenfassung	25
11.	Literatur	26

1. Einleitung und Problemstellung

Im Rahmen der Operation *Allied Force* vom 22. März bis 10. Juni 1999 haben Alliierte Streitkräfte auch Munition mit abgereichertem Uran (englisch „Depleted Uranium“; DU), gegen gepanzerte Ziele eingesetzt. Für Soldaten des deutschen Heeres-Kontingents KFOR (*DtHKtgt KFOR*), die im Gebiet des Kosovo eingesetzt werden, sollte deshalb untersucht werden, ob mit ihrem Aufenthalt und ihrer Tätigkeit dort, die zeitlich deutlich nach den militärischen Aktionen von Flugzeugen aus, eine mögliche Gesundheitsgefährdung durch das weitere Vorhandensein von Uran in den Überresten Inkorporation von Uran verbunden ist.

Die Frage einer möglichen Inkorporation von Uran kann prinzipiell durch Messungen der Uran-Ausscheidung im Urin beantwortet werden, da das Stoffwechselverhalten von inkorporiertem Uran hinreichend verlässlich bekannt ist. Auf eine Anfrage des Bundesministeriums der Verteidigung (BMVg) vom 30.6.1999 wurde von dem *GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg*, dem BMVg ein Angebot zur Durchführung entsprechender Untersuchungen unterbreitet und von diesem in der vorgeschlagenen Form akzeptiert. Seitens des BMVg wurde zur Betreuung der Studie eine spezielle Arbeitsgruppe (Studiengruppe „Biomonitoring“) eingerichtet. Die ersten Untersuchungen wurden am 30.11.1999 durchgeführt.

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse dieser Untersuchungen in der Zeit vom 30.11.1999 bis 17.12.2000 zusammen und bewertet sie. Er ist folgendermaßen gegliedert: In Abschnitt 2 werden in aller Kürze die wesentlichen Eigenschaften von Uran bzw. DU, insbesondere ihre radiologischen Charakteristika, dargestellt. In Abschnitt 3 werden die Grundzüge des Stoffwechselverhaltens von Uran beschrieben, gefolgt von einer Beschreibung der chemischen Toxizität und Radiotoxizität von Uran und DU in Abschnitt 4. Für die Beurteilung einer zusätzlichen Inkorporation von Uran bzw. DU ist es wichtig zu wissen, welcher Anteil an einem gemessenen Wert der Urankonzentration im Urin auf natürliche Quellen zurückzuführen ist. Deshalb wird darauf in einem gesonderten Abschnitt (Abschnitt 5) detailliert eingegangen. Die von uns verwendete Meßmethode zur Bestimmung von Uran im Urin und die Implikationen für die Interpretation von Meßergebnissen werden in Abschnitt 6 dargestellt. Der geplante Umfang und der organisatorische Ablauf der Untersuchungen werden in Abschnitt 7 beschrieben. Eine Zusammenstellung der bisher gewonnenen Ergebnisse findet sich in Abschnitt 8, die Diskussion und Bewertung der Resultate in Abschnitt 9. Eine Kurzzusammenfassung der Studie gibt Abschnitt 10. Abschnitt 11 enthält eine Liste wissenschaftlicher Publikationen zu diesem Thema. Die Tabellen mit den individuellen Meßergebnissen werden aus Datenschutzgründen hier nicht dargestellt.

2. Abgereichertes Uran (Depleted Uranium; DU)

Uran ist ein natürliches Element mit der Ordnungszahl 92, ein silbergraues Schwermetall, das mit einem durchschnittlichen Gehalt von etwa 3 mg pro kg im Erdboden häufiger vorkommt als beispielsweise Quecksilber, Silber oder Gold. **Natururan** besteht aus drei verschiedenen Isotopen, nämlich zu 99,2745% aus ^{238}U , zu 0,7200% aus ^{235}U und zu 0,0055%

aus ^{234}U (s. Tabelle 1). ^{238}U und ^{235}U sind primordiale Substanzen und die Ausgangsnuklide für zwei der drei natürlichen Zerfallsreihen (das dritte Ausgangsnuklid ist ^{232}Th), die über eine Serie von ebenfalls radioaktiven Folgeprodukten schließlich alle in einem stabilen Bleiisotop enden. Diese Folgeprodukte können teilweise in der örtlichen Umgebung des zerfallenden Atomkerns verbleiben und sind bei der Bewertung der Toxizitäten auch zu berücksichtigen.

Für die meisten Anwendungen in der Nukleartechnik reicht der vergleichsweise geringe Anteil an dem spaltbaren ^{235}U (0,7200%) im Natururan nicht aus, er muß in einem Anreicherungsprozeß erhöht werden. Der bei diesem Isotopen-Trennungsprozeß übrig bleibende Anteil wird dadurch zu hinsichtlich ^{235}U (und auch ^{234}U) zu **abgereichertem Uran** (*Depleted Uranium; DU*). Üblicherweise enthält DU noch 0,2 – 0,3 % ^{235}U . Bei dem Anreicherungsprozeß wird das radioaktive Gleichgewicht, in dem sich das Uran in einer ungestörten Umgebung im allgemeinen befindet, unterbrochen. Die radioaktiven Folgeprodukte werden deshalb hier, bis auf die jeweils ersten, kürzerlebigen Tochternuklide (^{234}Th und ^{234}Pa bei ^{238}U ; ^{231}Th für ^{235}U), nicht weiter betrachtet.

Tabelle 1: Radiologische Eigenschaften von Natururan und abgereichertem Uran (DU)

Isotop	Halbwertszeit (Jahre)	Massen- Anteil (%)	Aktivität (mBq/µg U)	Aktivitäts- Verhältnis $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	Aktivitäts- Verhältnis $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$
Natururan					
^{234}U	$2,450 \times 10^5$	0,0055	12,40		
^{235}U	$7,037 \times 10^8$	0,7200	0,60		
^{238}U	$4,468 \times 10^9$	99,2745	12,40		
Gesamt			25,40	1,00	0,048
Abgereichertes Uran (<i>Depleted Uranium; DU</i>)					
^{234}U	$2,450 \times 10^5$	0,0010	2,26		
^{235}U	$7,037 \times 10^8$	0,2000	0,16		
^{238}U	$4,468 \times 10^9$	99,8000	12,40		
Gesamt			14,80	0,18	0,013

Die wichtigsten radiologischen Eigenschaften von Natururan und abgereichertem Uran sind in **Tabelle 1** dargestellt. Wegen der geänderten Isotopenzusammensetzung ist auch die Radioaktivität von Natururan und DU verschieden. Die Aktivität pro Masse Uran beträgt für Natururan etwa 25,40 mBq/µg Uran, während sie für abgereichertes Uran (mit 0,2% ^{235}U) bei 14,80 mBq/µg Uran liegt. Die spezifische Aktivität von DU, und auch die **Radiotoxizität** (s. Abschnitt 4) ist also für DU um etwa 40% geringer als die von Natururan.

Die Unterschiede in den spezifischen Aktivitäten (bezogen auf die Masse des entsprechenden Isotops) sind für die einzelnen Uranisotope sehr groß, sie verhalten sich reziprok zu den entsprechenden Halbwertszeiten. So weist ^{235}U eine etwa sechsfach und ^{234}U eine etwa 18000-fach höhere spezifische Aktivität auf als ^{238}U (s. **Tabelle 2**). Insgesamt zählen aber sowohl Natururan wie auch DU zu den schwach radioaktiven Substanzen

Tabelle 2: Spezifische Aktivitäten der wichtigsten Uranisotope (bei Isotopen-Reinheit)

Isotop	Spezifische Aktivität	
	(Bq /mg)	(μg / Bq)
^{234}U	$2,3 \times 10^5$	$4,3 \times 10^{-6}$
^{235}U	71,1	14,1
^{238}U	12,4	80,4

Obwohl DU günstige Materialeigenschaften hat, wie z.B. seine sehr hohe Dichte von $19,3 \text{ g/cm}^3$ (Blei $11,3 \text{ g/cm}^3$), sind seine Verwendungsmöglichkeiten wegen der nach wie vor vorhandenen Radioaktivität dennoch sehr eingeschränkt. Neben der Verwendung von DU in **zivilen** Bereichen, z.B. als Ausgleichsgewicht in Flugzeugen und im Kiel von Rennjachten oder als Abschirmmaterial an Bestrahlungseinrichtungen in Kliniken, findet DU Verwendung im **militärischen** Bereich als Kern von Geschossen. Wegen seiner besonderen physikalischen Eigenschaften besitzen solche Projektile eine sehr hohe Durchschlagskraft, auch gegen gepanzerte Ziele. Je nach Material und Dicke der getroffenen Panzerung wird beim Auftreffen ein Teil des DU in ein Aerosol verwandelt (typischerweise zwischen 10–30%, maximal bis 70%), das wegen seiner pyrophoren Eigenschaften größtenteils sofort zu schwerlöslichen Uranoxiden verbrennt. Ein erheblicher Anteil dieser Teilchen sind von „inhalierbarer“ Größe ($< 10 \mu\text{m}$), wodurch grundsätzlich die Möglichkeit besteht, daß sie eingeatmet und selbst in tieferen Bereichen des Atemtrakts abgeschieden werden können.

Auch nach Ablagerung des Aerosols auf dem Boden besteht die Möglichkeit, dass es durch Wind resuspendiert und eingeatmet wird oder dass es mit Nahrung oder Wasser ingestiert wird und so in den menschlichen Körper gelangt. Diese Prozesse und die damit möglicherweise verbundene Gesundheitsgefährdung werden in den folgenden Abschnitten genauer diskutiert.

Dagegen sind die **externen** Strahlendosen in der Nähe von DU sehr gering. Die spezifische Gammadosisrate von reinem ^{238}U beträgt $8,6 \cdot 10^{-8} \mu\text{Sv/g} \cdot \text{h}$ in 1 m Abstand. Eine Punktquelle von 1 kg DU führt in einer Distanz von 1 m zu einer Dosis von nur einigen μSv pro Jahr. Dies entspricht etwa einem Tausendstel der natürlichen Strahlendosis in Deutschland pro Jahr.

3. Stoffwechselverhalten von Uran

Wie oben ausgeführt, ist Uran ein natürlich vorkommendes radioaktives Element, das sich seit der Entstehung der Erde praktisch überall in der Erdkruste findet. Je nach geologischem Untergrund liegt die Urankonzentration im Erdboden zwischen etwa 1 mg/kg und 10 mg/kg Boden, mit einem Mittelwert von etwa 3 mg/kg. Entsprechend seiner Löslichkeit enthalten deshalb auch pflanzliche und tierische Nahrungsmittel und Wasser (in Deutschland 0,0001 bis 40 µg pro Liter) in unterschiedlichem Ausmaß geringe Anteile von Uran. Deshalb nimmt jeder Mensch täglich eine gewisse Menge davon auf und scheidet es auch wieder aus. Die Gesamtheit des Verhaltens eines Stoffes im Körper (Zufuhr, Aufnahme, Verteilung, Ausscheidung) bezeichnet man als **Biokinetik**. Auch wenn Uran kein essentielles Element ist, so folgt es in seinem biokinetischen Verhalten in vielem dem von anderen essentiellen oder toxischen Metallen. Da das chemische und damit das biologische Verhalten von Uran nicht von der Isotopenform abhängt, haben DU und Natururan das gleiche biokinetische Verhalten.

Der Gesamtgehalt an Uran im menschlichen Körper beträgt bei nicht-exponierten Personen im Mittel etwa 56 µg (entsprechend 690 mBq ^{238}U) [1]. Der Hauptteil davon entfällt mit 32 µg oder 56% auf das Skelett, gefolgt von Muskelgewebe (11 µg), Fettgewebe (9 µg), Blut (2 µg), sowie Lunge, Leber und Nieren mit jeweils weniger als 1 µg Uran.

Die Hauptzufuhr von Uran in den menschlichen Körper erfolgt über die Ingestion von Nahrungsmitteln und Wasser. Frisches Gemüse, Getreideprodukte und bestimmte Fischarten liefern mit ca. 10 bis 200 mBq pro kg Frischgewicht dabei die größten Beiträge [2]. Darüberhinaus können aber auch bestimmte Mineralwässer erhebliche Urankonzentrationen (0,001 bis 500 mBq/L) aufweisen [3], so daß deren regelmäßiger Konsum den Hauptbeitrag zur Uranaufnahme liefern kann. Über die mittlere tägliche Zufuhr von Uran in verschiedenen Ländern liegen eine Reihe von Untersuchungen vor, die meisten Werte liegen zwischen 11 und 18 mBq ^{238}U pro Tag, entsprechend 0,9 bis 1,5 µg Uran [4]. Von der zugeführten Menge werden nur etwa 2% aus dem Magen-Darm-Trakt tatsächlich in den systemischen Teil des Körpers aufgenommen, der Rest passiert den Gastrointestinaltrakt ohne Absorption und wird über die Fäzes in einigen Tagen wieder ausgeschieden.

Der Inhalationspfad spielt bei der natürlichen Uranaufnahme keine Rolle; typische Luftkonzentrationen liegen bei 0,5 µBq/m³. Bei unfall- oder berufsbedingten Expositionen, oder bei Expositionen mit resuspendierten DU-Aerosolen und Stäuben kann dieser Zufuhrpfad jedoch die relative Hauptrolle spielen. Dabei wird das weitere Schicksal eines inhalierten Teilchens wesentlich von seinen physiko-chemischen Eigenschaften bestimmt. Von der Teilchengröße hängt es ab, wie tief es in die Lunge eindringen kann und wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, daß es dort abgeschieden wird. Seine chemische Löslichkeit bestimmt dann, welchen Clearance- und Lösungsmechanismen es im weiteren Verlauf unterworfen ist, d.h. welcher Teil gelöst und ins Blut aufgenommen und damit in andere Bereiche des Körpers transportiert wird. Diese Größen bestimmen auch in sehr starkem Maße die daraus resultierende Strahlendosis, wie unten noch gezeigt wird. Das aus der Lunge ins Blut aufge-

nommene Uran unterliegt danach demselben metabolischen Veränderungen wie das systemische bzw. das intestinal absorbierte.

Uran, das in den systemischen Teil des Körpers aufgenommen wird, wird zu einem großen Teil rasch wieder über die Niere ausgeschieden. Der Rest verteilt sich, wie oben beschrieben, in verschiedenen Organen und wird mit einer längeren Halbwertszeit ebenfalls über den Urin ausgeschieden [5]. Die endogene fäkale Ausscheidung spielt für Uran nur eine untergeordnete Rolle. Bei konstanter chronischer Zufuhr stellt sich näherungsweise ein Gleichgewicht zwischen dem Urangehalt im Körper und der renalen Ausscheidung ein. Da bei Ingestion von Uran 98% den Magen-Darm-Trakt passieren, ohne absorbiert zu werden, spiegelt die fäkale Uranausscheidung im wesentlichen nur den aktuellen Urangehalt der Nahrung wider. Da dieser Prozeß spätestens nach 3-4 Tagen abgeschlossen ist, können durch Stuhlmessungen nur kurze Zeit zurückliegende Uraninkorporationen verlässlich nachgewiesen werden, jedoch keine Inkorporationen durch Inhalation. Dagegen kann davon ausgegangen werden, daß die Uranausscheidung im Urin proportional zum Körpergehalt ist. **Deshalb wird in dieser Studie die renale Uranausscheidung zum Nachweis von inkorporiertem Uran herangezogen.**

Das Biokinetikmodell für systemisches Uran ist ausführlich in der ICRP Publikation Nr. 69 beschrieben [6]. Zusammen mit dem Atemtraktmodell der ICRP (ICRP Publikation Nr. 66) [7] können die für verschiedene Zufuhrmodi zu erwartenden Uran-Ausscheidungen im Urin für verschiedene Zeitpunkte nach Exposition berechnet werden. Eine Zusammenstellung der Retentions- und Ausscheidungsfunktionen für alle radiologisch wichtigen Radionuklide findet sich in ICRP Publikation Nr. 78 [8]. Beispielhaft sind für einige Zeitpunkte die für Uran zu erwartenden Werte in **Tabelle 3** dargestellt.

Tabelle 3: Zu erwartende ²³⁸U-Ausscheidungen im Urin (in Bq/d pro Bq Zufuhr) bei verschiedenen Expositionsszenarien (nach ICRP Publikation Nr. 78)

Zufuhrpfad	Zeit nach Exposition		
	1 d	30 d	180 d
Inhalation (akut; AMAD=1µm)			
Löslichkeitstyp F (Fast)	$1,8 \times 10^{-1}$	$6,8 \times 10^{-4}$	$(3,1 \times 10^{-5})$
Löslichkeitstyp M (Moderate)	$2,3 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-4}$	$6,5 \times 10^{-5}$
Löslichkeitstyp S (Slow)	$7,0 \times 10^{-4}$	$7,7 \times 10^{-6}$	$3,3 \times 10^{-6}$
Ingestion (akut; $f_1 = 0,02$)	$1,3 \times 10^{-2}$	$4,8 \times 10^{-5}$	$2,2 \times 10^{-5}$
Direktaufnahme ins Blut	$6,5 \times 10^{-1}$	$2,4 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-4}$

Wie **Tabelle 3** zeigt, sind die renal ausgeschiedenen Fraktionen inkorporierten Urans selbst bei der Inhalation von schwerlöslichen Verbindungen noch längere Zeit nach Inkorporation beträchtlich. Das bedeutet, daß durch die Messung der Uranausscheidung im Urin auch unter diesen Umständen signifikante Uraninkorporationen noch erkannt werden können. In

Abschnitt 9 wird das im Zusammenhang mit den hier erhobenen Meßwerten genauer diskutiert.

4. Toxizität von Uran

Eine mögliche Gesundheitsgefährdung durch DU, und allgemein durch Uran, wird durch zwei seiner Eigenschaften begründet:

- Uran ist ein Schwermetall und als solches **chemisch toxisch** (ähnlich wie andere Schwermetalle, beispielsweise Wolfram, Blei, Cadmium und Quecksilber);
- Alle Uran-Isotope sind **radioaktiv**, d.h. bei ihrer spontanen Umwandlung wird energiereiche Strahlung freigesetzt und diese Strahlung kann biologisch schädlich sein.

4.1 Chemische Toxizität

Die **chemische Toxizität** eines Schwermetalls ist für alle Isotope eines Elementes gleich. Da sich Natur-Uran und DU nur in ihrer Isotopen-Zusammensetzung unterscheiden, ist demnach ihre chemische Toxizität identisch. Schwermetallverbindungen in Lösungen können eine Reihe von zytotoxischen Effekten hervorrufen. Für Uran sind die wichtigsten Oxyanionen in biologischen Systemen die Carbonat/Bicarbonat-Verbindungen, z.B. $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$ [9, 10]. Während diese Verbindungen bei neutralem pH-Wert (dem pH im Blut) recht stabil und in dieser Form nicht sehr reaktiv sind, wird bei niedrigem pH (wie z.B. im Urin) das sehr reaktive Uranylion $[\text{UO}_2]^{2+}$ freigesetzt.

Dementsprechend gilt **die Niere** als das Zielorgan für die chemische Toxizität von Uran. Ähnlich wie bei Quecksilber, Cadmium und anderen Schwermetallen führen erhöhte Urankonzentrationen zu einer Verminderung der glomerulären Filtration, der tubulären Sekretion von organischen Anionen, sowie der Rückresorption von gefilterter Glukose und Aminosäuren in den proximalen Tubuli [11].

Die Schwere der Einschränkungen hängt dabei von der Höhe der Urankonzentration ab. So gilt eine einmalige Inhalation von 8 mg Uran in löslicher Form als Schwellenwert für das Auftreten von vorübergehenden Nierenschäden, bzw. 40 mg können dort persistierende Schäden hervorrufen.

In der US-Uranindustrie gelten heute **0,05 mg Uran pro m³ Luft** in löslicher Form und 0,25 mg in unlöslicher Form **als sicherer Grenzwert bei chronischer Exposition der Arbeiter**. Diese Werte stellen sicher, daß eine Konzentration von 3 µg/g in der Niere nicht überschritten wird. Auch in Deutschland gilt ein MAK-Wert von 0,25 mg/m³. In der Literatur werden aus den Anfangsjahren der Uranindustrie viel höhere Expositionen von bis zu 10 mg/m³ erwähnt, ohne dass gesundheitliche Beeinträchtigungen bei den Beschäftigten nachweisbar waren.

Welche Ausscheidungswerte von Uran im Urin bei verschiedenen Expositions-Szenarien zu erwarten sind, wurde im vorhergehenden Abschnitt bereits dargelegt (s. Tabelle 3).

4.2 Radiotoxizität

Die schädigende Wirkung der bei radioaktiven Umwandlungen freiwerdenden **ionisierenden Strahlung** ist im Wesentlichen eine Folge der Energieabsorption im Körpergewebe. Maßeinheit der Strahlendosis ist das Sievert (Sv), abgeleitet davon das Millisievert und das Mikrosievert ($1 \text{ Sv} = 1.000 \text{ mSv} = 1.000.000 \text{ }\mu\text{Sv}$). Der Bezug zwischen der inkorporierten Aktivität eines radioaktiven Stoffes (in Bq) und der von ihm hervorgerufenen Strahlendosis (in Sv) wird durch die **Dosiskoeffizienten** (Sv/Bq) hergestellt.

Den Dosisberechnungen für Uran liegt, wie erwähnt, das in den ICRP Publikationen beschriebene Biokinetikmodell (Nr. 69) und dosimetrische Atemtraktmodell (Nr. 66) zugrunde. Die mit der Novellierung der Strahlenschutzverordnung anzuwendenden Dosiskoeffizienten für alle wichtigen Radionuklide, für die verschiedenen Zufuhrpfade und chemischen Formen, sowie nach Lebensaltergruppen, sind in den Tabellen der Richtlinie 92/96 EURATOM des Rates vom 13. Mai 1996 (Amtblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 29.6.1996, ISSN 0376-9453) [12] enthalten; sie entsprechen den Werten in den ICRP-Publikationen Nr. 56, 67, 69, 71, 72 [13, 14, 6, 15, 16]. Die Dosiskoeffizienten für die effektive Folgedosis der hier bedeutsamen Uranisotope sind in **Tabelle 4** dargestellt. (Die Organ-Dosiskoeffizienten für Uran für Ingestion finden sich in ICRP Publikation Nr. 69, für Inhalation in ICRP Publikation Nr. 71).

Tabelle 4: Effektive Folgedosis pro Inkorporation (Sv/Bq) für ^{234}U , ^{235}U und ^{238}U für verschiedene Zufuhrmodi (nach EURATOM RL 92/96)

Zufuhrpfad	Radionuklid		
	^{234}U	^{235}U	^{238}U
Inhalation (akut; AMAD=1 μm)			
Löslichkeitsklasse F (<i>Fast</i>)	$5,6 \times 10^{-7}$	$5,2 \times 10^{-7}$	$5,0 \times 10^{-7}$
Löslichkeitsklasse M (<i>Moderate</i>)	$3,5 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-6}$	$2,9 \times 10^{-6}$
Löslichkeitsklasse S (<i>Slow</i>)	$9,4 \times 10^{-6}$	$8,5 \times 10^{-6}$	$8,0 \times 10^{-6}$
Ingestion (akut; $f_1 = 0,02$)	$4,9 \times 10^{-8}$	$4,7 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-8}$
Direktaufnahme ins Blut	$2,3 \times 10^{-6}$	$2,1 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$

Die Radiotoxizität, ausgedrückt durch die Höhe der Dosiskoeffizienten, hängt zum einen von den Strahlungseigenschaften des jeweiligen Nuklids ab und ist dementsprechend für jedes Uran-Isotop unterschiedlich. Außerdem hängt die resultierende Dosis, wie mehrfach erwähnt, stark von den biokinetischen Parametern ab. Das wird in **Tabelle 4** deutlich. So ist der Inhalationsdosiskoeffizient für schwerlösliches Material (Klasse S) um mehr als eine Größenordnung höher als für Material mit hoher Löslichkeit (Klasse F).

Eine chronische und konstante Zufuhr per Ingestion von etwa 1,5 μg Natururan pro Tag, wie sie sich als Mittelwert für Deutschland plausibel abschätzen läßt (s. Abschnitt 3), führt –

ohne seine Tochterprodukte in der Nahrung - zu einer mittleren effektiven Dosis von weniger als 1 μSv pro Jahr und ist damit im Vergleich zu den anderen aus natürlichen Quellen resultierenden Dosiswerten (etwa 2,4 mSv) äußerst gering.

Für Isotopengemische, wie sie Natururan und DU darstellen, sind für die Dosisermittlung die Beiträge der einzelnen Isotope anteilig zu bewerten. Für DU ergibt sich deshalb wegen seiner geringeren spezifischen Aktivität eine niedrigere Radiotoxizität als für Natururan. Wie in Abschnitt 2 beschrieben und in **Tabelle 1** dargestellt, ist die spezifische Aktivität von DU mit 14,80 mBq/ μg Uran etwa 40% niedriger als die von Natururan mit 25,40 mBq/ μg Uran (s. Tabelle 1).

Wie im Falle der chemischen Toxizität existiert auch für die ionisierende Strahlung eine Schwellendosis, unterhalb der keine Symptome einer **akuten Strahlenkrankheit** beobachtet werden. Sie liegt im Bereich von etwa 1 Sv. Für das Auftreten von **Spätschäden** einer Bestrahlung, z.B. in Form einer erhöhten Wahrscheinlichkeit, später an Krebs zu erkranken oder eine Schädigung des Erbgutes zu erleiden, ist eine Wirkungsschwelle nicht bekannt. Sicherheitshalber wird deshalb im Strahlenschutz angenommen, dass Spätschäden auch im Niedrigdosisbereich dosisproportional bis hin zur Nulldosis auftreten können. Aufgrund der Untersuchungen an den Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki, sowie basierend auf umfangreichen epidemiologischen Daten geht man derzeit von etwa 0,005% zusätzlichen Krebsfällen und Erbschäden pro mSv effektiver Folgedosis aus [17]. Der derzeit geltende Dosisgrenzwert für Einzelpersonen der allgemeinen Bevölkerung für zivilisatorisch bedingte zusätzliche Strahlenexpositionen beträgt 1 mSv pro Jahr. Durch eine solche Exposition wird das natürliche Krebsrisiko höchstens unmeßbar erhöht. Ausdrücklich ausgenommen von diesem Grenzwert sind dabei jedoch Expositionen durch Radon in Wohnungen oder infolge des natürlichen Strahlenuntergrundes.

In diesem Zusammenhang sollte darauf hingewiesen werden, daß die aus **natürlichen** Quellen (kosmische Strahlung, terrestrische Strahlung, Radon, ^{40}K , u.a.) resultierende mittlere effektive Strahlendosis in Deutschland etwa 2,4 mSv pro Jahr beträgt. Dazu kommen aus medizinischen Anwendungen (radiologische und nuklearmedizinische Diagnostik) mittlere Dosiswerte von mehr als 1,5 mSv, womit sich eine **mittlere effektive Dosis von mehr als 4 mSv pro Jahr für Personen der Allgemeinbevölkerung** ergibt, mit einer erheblichen individuellen Variabilität. Alle Strahlenexpositionen sollten unter dem Aspekt beurteilt werden, daß sich unser Leben immer und überall in einem Umfeld von vielfältigen Strahlenfeldern abspielt. Diese Strahlenexpositionen betragen im Mittel etwa 10 μSv pro Tag.

5. Renale Uran-Ausscheidung bei nicht-exponierten Personen

Wie in Abschnitt 3 ausgeführt, bietet die Messung der Uran-Ausscheidung im Urin, im Gegensatz zu Stuhl-Messungen, eine verlässliche Grundlage für die Bewertung einer möglichen vorherigen Inkorporation von DU. Die Direktmessung von Uran im Körper ist sehr unempfindlich, da wegen der sehr geringen Anteile an Gammastrahlung bei der Umwandlung von Uran die Nachweisgrenzen dieser Methode bei ≥ 200 Bq liegen, also 15 mg Uran. Deshalb

wird die renale Uran-Ausscheidung hier in einem eigenen Abschnitt gesondert und detailliert behandelt.

Bisher waren die Kenntnisse über den Urangehalt im Körper nicht-exponierter Personen und die daraus resultierende Ausscheidung im Urin sowie die Abhängigkeit dieser Werte von Geschlecht und Alter nur sehr begrenzt, da diese Daten mittels der zur Verfügung stehenden radiometrischen Verfahren, wie z.B. der Alphastrahlenspektrometrie nur mit sehr großem Aufwand gewonnen werden konnten. Die Entwicklung neuer massenspektrometrischer Verfahren, wie sie in Abschnitt 6 beschrieben sind, ermöglichte es uns nun, zuverlässige Referenzdaten für die Uranausscheidung von nicht-exponierten Personen zu erarbeiten. Erst die Kenntnis von Referenzwerten erlaubt eine sinnvolle Interpretation von Meßwerten und die Abgrenzung zusätzlicher Inkorporationen vom natürlichen Untergrund.

Eigene Untersuchungen zur Uranausscheidung im Urin bei nicht-exponierten Personen wurden bei mehr als zweihundert gesunden Freiwilligen beiderlei Geschlechts im Alter zwischen 7 und 84 Jahren und aus verschiedenen Gegenden Deutschlands durchgeführt. Die Resultate dieser Untersuchungen [3, 18, 19, 20] lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Bezüglich der renalen Ausscheidung von Uran pro Tag besteht kein Unterschied zwischen Männern und Frauen;
2. Im Mittel nehmen die Werte mit dem Lebensalter zu;
3. Die Variationsbreite nimmt mit zunehmendem Alter stark zu. Während bei Kindern die Ausscheidungswerte erwartungsgemäß meist niedrig sind, werden bei Erwachsenen auch deutlich höhere Werte beobachtet. Interessanterweise gibt es jedoch auch in höheren Lebensjahren noch Personen mit sehr niedrigen Werten, d.h. tatsächlich tritt eine Aufspaltung der Ausscheidungswerte über etwa 2 Größenordnungen ein. Ein solches Verhalten ist aber nicht spezifisch für Uran, sondern findet sich auch für andere langlebige Radionuklide wie z.B. ^{226}Ra und ^{232}Th , oder auch für nicht-radioaktive Schwermetalle.

Aus den bei gesunden Freiwilligen erhobenen Werten läßt sich explorativ ein altersabhängiger Mittelwert und ein oberer Erfahrungswert für die Uranausscheidung im Urin bei nicht bewußt zusätzlich exponierten Personen ableiten. Das entsprechende Ergebnis ist in **Abbildung 1** dargestellt. Bei diesen Untersuchungen wurden aber durchaus einige Werte oberhalb dieses typischen Referenzbereichs festgestellt.

Demnach ergibt sich für ein Lebensalter von 20 Jahren ein Mittelwert von 15 ng/d, für 50 Jahre liegt er bei etwa 30 ng/d, die oberen Grenzen des Referenzbereichs liegen bei 30 ng/d bzw. 70 ng/d. Die oberen Werte des Referenzbereichs dürfen dabei nicht als ein Schwellenwert für eine gesundheitliche Gefährdung mißverstanden werden. Sie begrenzen lediglich den Bereich, in dem die meisten (nicht alle) der bei Gesunden erhobenen Werte liegen. Nach heutigem Kenntnisstand über die Toxizität von Uran würde eine gesundheitsgefährdende Inkorporation zu Ausscheidungswerten führen, die um mehr als eine Größenordnung über

diesen Werten liegt. In den Tabellen mit den Ergebnissen der Messungen bei den KFOR – Angehörigen (Abschnitt 8.) sind zusammen mit dem Meßwert zu Vergleichszwecken auch jeweils der altersadjustierte Mittelwert und der obere Referenzwert für nicht-exponierte Personen angegeben.

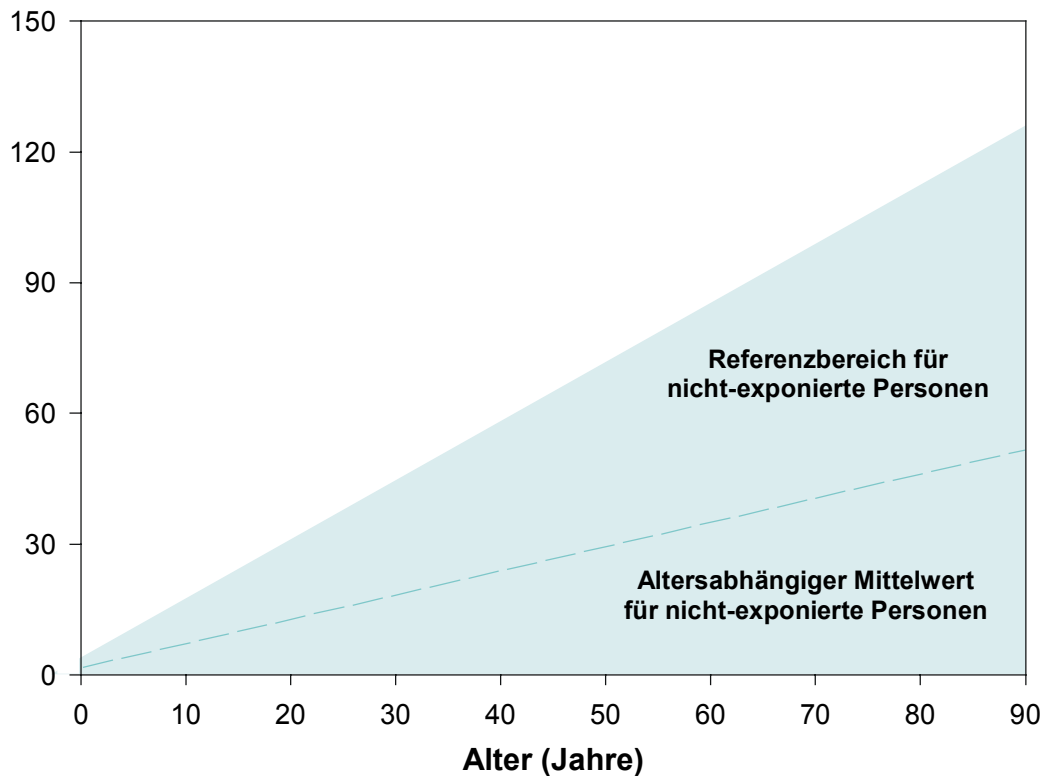


Abb. 1: Uran-Ausscheidung im Urin: Altersabhängiger Mittelwert und Referenzbereich für nicht-exponierte Personen

Für den großen Variationsbereich der Ausscheidungswerte sind zu einem großen Teil die individuellen Lebensgewohnheiten verantwortlich. Bei Meßwerten, die wesentlich oberhalb des Referenzbereichs liegen, sollte deshalb zunächst eine sorgfältige Ernährungsanalyse vorgenommen werden, insbesondere hinsichtlich des Verbrauchs und des Abfüllers von Mineralwasser. Darüberhinaus kommt es jedoch auch bei der gleichen Person zu erheblichen Schwankungen in der täglichen Ausscheidung, die über unterschiedliche Ernährungsgewohnheiten hinausgehen und über deren Ursachen bisher noch keine eingehenden Erkenntnisse vorliegen. Beispiele dafür sind in **Abbildung 2** dargestellt, wo auch der Einfluß des regelmäßigen Konsums von Mineralwasser noch einmal deutlich wird.

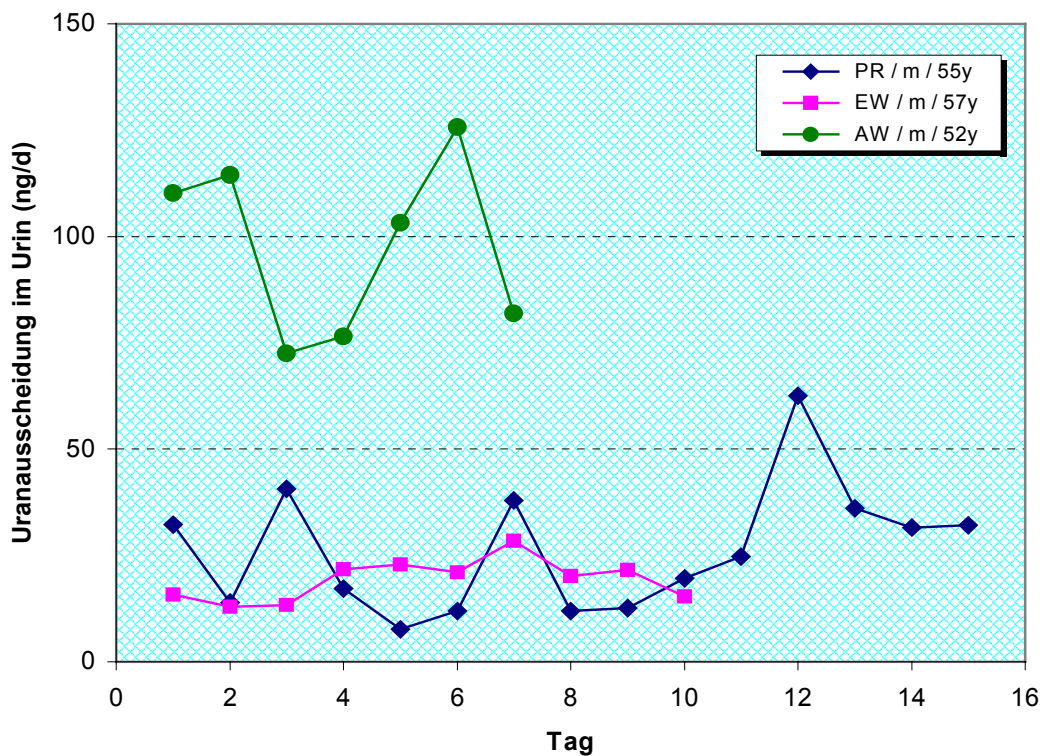


Abb. 2: Schwankungen in der täglichen Uranausscheidung bei drei nicht-exponierten Personen an aufeinander folgenden Tagen; AW: ca 2 l Mineralwasser (Urangehalt ca 10 µg/l) / Tag

Die individuelle Schwankungsbreite der Ausscheidungswerte kann dabei sehr unterschiedlich sein, wie **Abbildung 3** verdeutlicht. Unter der Annahme, daß die Meßwerte Gaussverteilt sind, ergeben sich individuell sehr große Unterschiede in der Breite der Meßwertverteilung, d.h. in den Standardabweichungen. Zur Vermeidung von falsch positiven Schlußfolgerungen aufgrund von erhöhten Ausscheidungswerten sollten deshalb nach Möglichkeit stets Mehrfach-Untersuchungen, am besten an aufeinander folgenden Tagen, durchgeführt werden.

Ein Vergleich der von uns erhobenen Daten mit in der Literatur vorliegenden Werten zeigt zum Teil deutliche Unterschiede. Nach ICRP-Publikation 23 [21] sollte die renale ^{238}U -Ausscheidung für nicht-exponierte Personen zwischen 600 und 6000 µBq pro Tag liegen (entsprechend 49 und 490 ng Uran pro Tag). Dagegen liegt die weit überwiegende Anzahl der hier erhobenen Werte unterhalb von 49 ng/Tag. Andererseits stimmen unsere Werte zufriedenstellend mit den Ergebnissen einer indischen Studie überein [22], die eine mittlere Ausscheidung von 12 ng/Tag finden. Alle anderen bisher publizierten Untersuchungen beschränken sich auf relativ geringe Fallzahlen und/oder benutzten nicht mehr dem neuesten Stand der Meßtechnik entsprechende Analysemethoden.

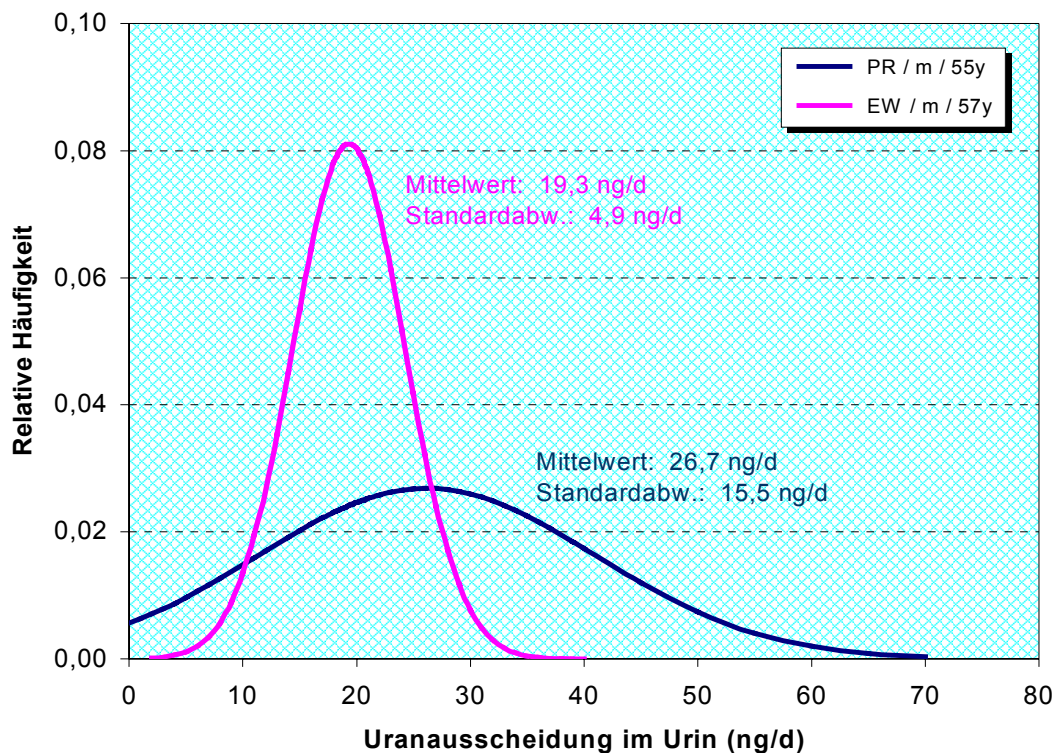


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung von n Meßwerten der täglichen Uranausscheidung bei zwei nicht-exponierten Personen;
(Person PR: $n = 15$; Person EW: $n = 10$).

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die von uns verfolgte Methode der Ermittlung der renalen Uran-Ausscheidung bei nicht-exponierten Personen und die Untersuchung ihrer Veränderung eine verlässliche Basis zur Beurteilung möglicher DU-Inkorporationen bei Angehörigen des DthKtgt KFOR darstellen.

6. Eingesetzte Meßverfahren

Die frühere Standardmethode zur Bestimmung von Uran in Ausscheidungen war die Alphastrahlenspektrometrie. Dieses Verfahren ist mit einem sehr hohen Arbeits- und Zeitaufwand verbunden und hat Nachweisgrenzen, die für das Ziel dieser Studie zu hoch sind. Die Entwicklung massenspektrometrischer Verfahren, insbesondere der ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry*) ermöglicht es jetzt, Ausscheidungsmessungen einfacher, schneller und genauer durchzuführen. Die Methode ist inzwischen hinreichend validiert und gilt damit auch als etabliert. Einzelheiten des Verfahrens sind in [23] und [24] beschrieben. Deshalb seien die wesentlichen Punkte der Uranbestimmung im Urin mittels ICP-MS hier nur kurz zusammengefaßt:

1. Es ist keine spezielle Probenpräparation nötig;
2. Die Nachweisgrenze für Uran in Urinproben beträgt etwa 1 ng/Liter. Damit können erstmals auch Referenzwerte für nicht-exponierte Personen erarbeitet werden;

3. Die Genauigkeit (Accuracy) und Reproduzierbarkeit (Precision, Reproducibility) sind gut;
4. Die Kalibrierkurve zeigt eine gute Linearität des Verfahrens über einen großen Konzentrationsbereich.

Im Verlauf der Etablierung der Meßmethode hat die Weiterentwicklung der Gerätetechnik zu einer neuen Generation mit wesentlich besserem Massenauflösungsvermögen, der sog. „hochauflösenden ICP-MS“, geführt. Bei dieser Sektorfeld-ICP-MS sind aber nicht nur mögliche Interferenzen zwischen den zu messenden Isotopenmassen und Matrixkomponenten bei den Massen der Uranisotope ausgeschlossen, sondern es wird eine mehr als zehnfach höhere Empfindlichkeit erreicht. Damit wird es möglich, neben ^{238}U auch das Isotop ^{235}U quantitativ zu bestimmen. Prinzipiell können damit Aussagen darüber getroffen werden, ob es sich um Uran mit natürlicher isotopenzusammensetzung oder um „angereichertes“ bzw. „abgereichertes“ Uran handelt. Allerdings ist noch weiterer Entwicklungsaufwand erforderlich, um das Isotopenverhältnis $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ in Urinproben mit Urangehalten im Referenzbereich Gesunder zufriedenstellend zu bestimmen.

Die Messung der Urankonzentration in Bodenproben, wie sie begrenztem Umfang als begleitende Maßnahme zur Abklärung des Expositionsumfeldes durchgeführt wurden, sind mit einem erheblich größeren analysetechnischen Aufwand verbunden. Dazu werden die Bodenproben über 3 Tage im Wärmeschrank bei 50°C getrocknet. Dann wird die Bodenproben mit Königswasser nach DIN 38406 aufgeschlossen. Dazu wird 1 g Boden mit hochreinem Wasser (MilliQ) angefeuchtet und mit 10 ml Königswasser versetzt und über Nacht (mindestens 12 Stunden) bei Raumtemperatur stehen lassen. Anschließend wird der Ansatz 3 Stunden unter Rückfluß gekocht, abfiltriert und dreimal mit Königswasser gewaschen. Das Filtrat wird mit hochreinem Wasser auf 100ml aufgefüllt und wie oben beschrieben mittels ICP-MS gemessen.

7. Durchgeführte Arbeiten

7.1 Studiengruppen

Die Überprüfung der Schutzmaßnahmen beim DthKtgt KFOR gegen die Inkorporation von Uran aus den eingestetzten NATO-Geschossen sollte sich auf frühere, gegenwärtige und zukünftige Kontingente erstrecken. Da zum Zeitpunkt des Beginns dieser Untersuchungen Angehörige vom DthKtgt KFOR von früheren Einsätzen in Kosovo bereits wieder zurückgekehrt waren, andere sich gerade im Einsatzgebiet aufhielten und zukünftige Kontingente sich auf ihren Einsatz vorbereiteten, wurden die Untersuchungen nach folgenden Kriterien strukturiert:

a) Erste Studiengruppe

Wegen der großen inter- und intra-individuellen Variabilität der Uranausscheidung wurden an einer Studiengruppe von deutschen KFOR-Soldaten diese Messungen **vor** ihrem Einsatz im Kosovo sowie etwa 2 Monate **nach Beginn** ihres Einsatzes durchgeführt. Vorgesehen waren 50 Personen in dieser Gruppe, tatsächlich konnten bei 43 Probanden die Messungen durchgeführt werden. Bezüglich ihrer Tätigkeit im Einsatzgebiet wurden dabei zwei Teilgruppen unterschieden

- (i) Soldaten, die aufgrund ihrer Tätigkeitsmerkmale im Einsatzgebiet wahrscheinlich mit Munition oder zerstörten Waffen und Geräten oder in starkem Maße mit Staub im Gelände in Kontakt kommen könnten, so daß eine Kontamination mit DU und damit eine Aufnahme von ^{238}U prinzipiell möglich war.
- (ii) Soldaten, die im Einsatzgebiet überwiegend im Bereich des Feldlagers/ Feldlazarets eingesetzt werden, so daß die Lebensverhältnisse vergleichbar mit der Gruppe (i) sind, Kontaminationen mit ^{238}U aber sehr unwahrscheinlich sind (Kontrollgruppe).

b) Zweite Studiengruppe: Soldaten im Einsatzgebiet

Soldaten des DthKtgt KFOR, die sich zum Zeitpunkt des Beginns der Untersuchung bereits im Kosovo aufhielten und die im Einsatzgebiet auftragsgemäß an DU-kontaminierten Objekten tätig geworden waren und bei denen der Verdacht auf Kontamination mit oder Inkorporation von ^{238}U besteht. Aus dieser Gruppe wurden 38 Personen untersucht.

c) Dritte Studiengruppe: Soldaten aus früheren Kontingenten

Soldaten aus früheren Kontingenten, die im Einsatzgebiet auftragsgemäß an DU-verdächtigen Objekten eingesetzt waren und bei denen nach Rückkehr ins Heimatland Verdacht auf Kontamination oder Inkorporation von abgereichertem Uran erhoben wird. Die Untersuchungen an Personen dieser Probandengruppe dauern naturgemäß noch an und werden auch in Zukunft nach Bedarf durchgeführt werden. Bis zum Redaktionsschluß dieses

Berichts wurden 41 Personen untersucht. Bei weiteren 15 Probanden aus dieser Gruppe werden die Untersuchungen derzeit durchgeführt.

7.2 Umweltproben

Zur Abklärung und Charakterisierung des möglichen Expositionsumfeldes wurden in geringerem Umfang auch Boden- und Wasserproben untersucht. Dazu wurden nach dem unten stehenden Schema an ausgewählten Fundstellen Bodenproben gewonnen (s. Abbildung 4). Die Bodenproben wurden, wie in Abschnitt 6 beschrieben, aufgeschlossen und gemessen.

Aus einer Stadtzisterne, die außerhalb des Feldlagers Prizren liegt, wird Rohwasser entnommen, über ein vorhandenes Rohrnetz einer Wasseraufbereitungsanlage zugeführt und dort über Anschwemmfilter und Chlorierung aufbereitet. Dieses Wasser wird in das Leitungsnetz des Feldlagers Prizren eingespeist und dort in allen Bereichen verwendet. Es wurden 4 Wasserproben aus verschiedenen Bereichen der Wasserversorgung untersucht und entsprechend den Urinproben gemessen.

7.3 Ablauf der Untersuchungen

Bei den Probanden der Gruppe 1 sollten die Untersuchungen **vor** ihrem Einsatz im Kosovo sowie etwa 2 Monate **nach Beginn** ihres Einsatzes durchgeführt werden. Zur Voruntersuchung sollten während der Vorausbildung der Soldaten an einem Kollektiv von etwa 50 Personen an je zwei aufeinander folgenden Tagen die Ausscheidung von Uran im 24-Stunden-Urin bestimmt werden. Organisation und Durchführung der Urinsammlung oblag dabei der Arbeitsgruppe „Biomonitoring“ der Bundeswehr. Die Sammelgefäße mit Anleitung sowie die Probengefäße wurden von der GSF zur Verfügung gestellt. Zwei Monate nach Beginn des Einsatzes im Kosovo wurden diese Untersuchungen in gleicher Weise wiederholt.

Untersuchungen bei Personen der Gruppen 2 und 3 wurden und werden im Einzelfall auf Anfrage von Truppenärzten bzw. der Arbeitsgruppe „Biomonitoring“ der Bundeswehr in entsprechender Weise durchgeführt.

7.4 Durchführung der Messungen

Die Gesamtzahl der bisher durchgeführten Messungen an allen Probanden beträgt 271. Bei den Probanden der ersten Studiengruppe wurden jeweils vier Messungen, und bei den anderen Gruppen in größerem Umfang Doppelbestimmungen durchgeführt.

Die Bestimmung der Uran -Ausscheidung im Urin wurde, wie in Abschnitt 6 beschrieben, von der GSF nach einem validierten Verfahren mittels ICP-MS (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry) durchgeführt. Alle Meßergebnisse einschließlich einer Bewertung wurden der Arbeitsgruppe „Biomonitoring“ zur Verfügung gestellt.

8. Ergebnisse

An 43 Probanden der **Studiengruppe 1** wurde **vor ihrem Einsatz** im Kosovo während der Vorausbildung die Uranausscheidung im Urin untersucht. Der Sammelzeitraum umfasste die Zeit zwischen 24.4.2000 und 9.5.2000, wobei der größte Anteil auf den 8.5.2000 und 9.5.2000 entfiel. Für 41 Probanden wurden jeweils 2 x 24h-Urin gesammelt, bei 2 Probanden wurde nur eine Sammlung durchgeführt. Die Sammlung wurde von der Arbeitsgruppe des BMVg organisiert und durchgeführt; jeweils eine nach Anweisung angesäuerte 100ml-Probe wurde der GSF zur Analyse übersandt.

Die individuellen Ergebnisse dieser Messungen sind in **Abbildung 5** graphisch dargestellt. Dabei zeigt **Abbildung 5a** die Ergebnisse der Einzelmessungen, während in **Abbildung 5b** jeweils die aus den Doppelbestimmungen (soweit durchgeführt) gebildeten Mittelwerte für die einzelnen Probanden dargestellt sind. Tabellen mit den Klarnamen und den individuellen Meßergebnisse der Probanden wurden der Studiengruppe gesondert zur Verfügung gestellt. Die angegebenen Gesamtvolumina für die 24h-Ausscheidung wurden von den zugehörigen Anamnesebögen bzw. von den Etiketten auf den Probengefäßen übernommen. In der Spalte „Uran“ sind die aufgrund der gemessenen Aktivitätskonzentrationen und der angegebenen Gesamtmenge ermittelten Tagesausscheidungen aufgelistet. Zur besseren Lesbarkeit sind diese Spalten hervorgehoben. Die Diskussion und Bewertung der Ergebnisse erfolgt im nächsten Abschnitt 9.

Die Nachmessungen bei den Probanden der **Studiengruppe 1 während** ihres Einsatzes im Kosovo wurden in der zweiten Septemberhälfte 2000 durchgeführt. Der Sammelzeitraum umfaßte die Zeit zwischen dem 14.09.2000 und dem 01.10.2000. Bei 33 Probanden wurden, wie beschrieben, Doppelmessungen an zwei aufeinander folgenden Tagen durchgeführt, bei einem Probanden wurde nur einmal 24h-Urin gesammelt. Die Urinsammlung wurde dabei von der Arbeitsgruppe BMVg im Einsatzgebiet organisiert und die Proben per Flugzeug am 02.10.2000 der GSF zur Analyse überbracht. Die individuellen Ergebnisse dieser Messungen sind entsprechend in **Abbildung 6** graphisch dargestellt, mit den Werten der Einzelmessungen in **Abbildung 6a** und den Mittelwerten der Doppelbestimmungen in **Abbildung 6b**.

Bei 38 Angehörigen des DthKtgt KFOR, die sich zu Beginn der Studie bereits im Einsatz befanden, wurde **während** ihres Einsatzes im Kosovo (**Studiengruppe 2**) die Uranausscheidung im Urin untersucht. Der Sammelzeitraum war die Zeit vom 28.03.2000 bis 03.04.2000. Bei 27 Probanden wurden dabei Doppelbestimmungen durchgeführt, bei 11 Probanden wurde eine Einzeluntersuchung durchgeführt. Die Urinsammlung wurde dabei von der Arbeitsgruppe BMVg im Einsatzgebiet organisiert und die Proben in einem Sammeltransport Anfang April 2000 der GSF zur Analyse überbracht.

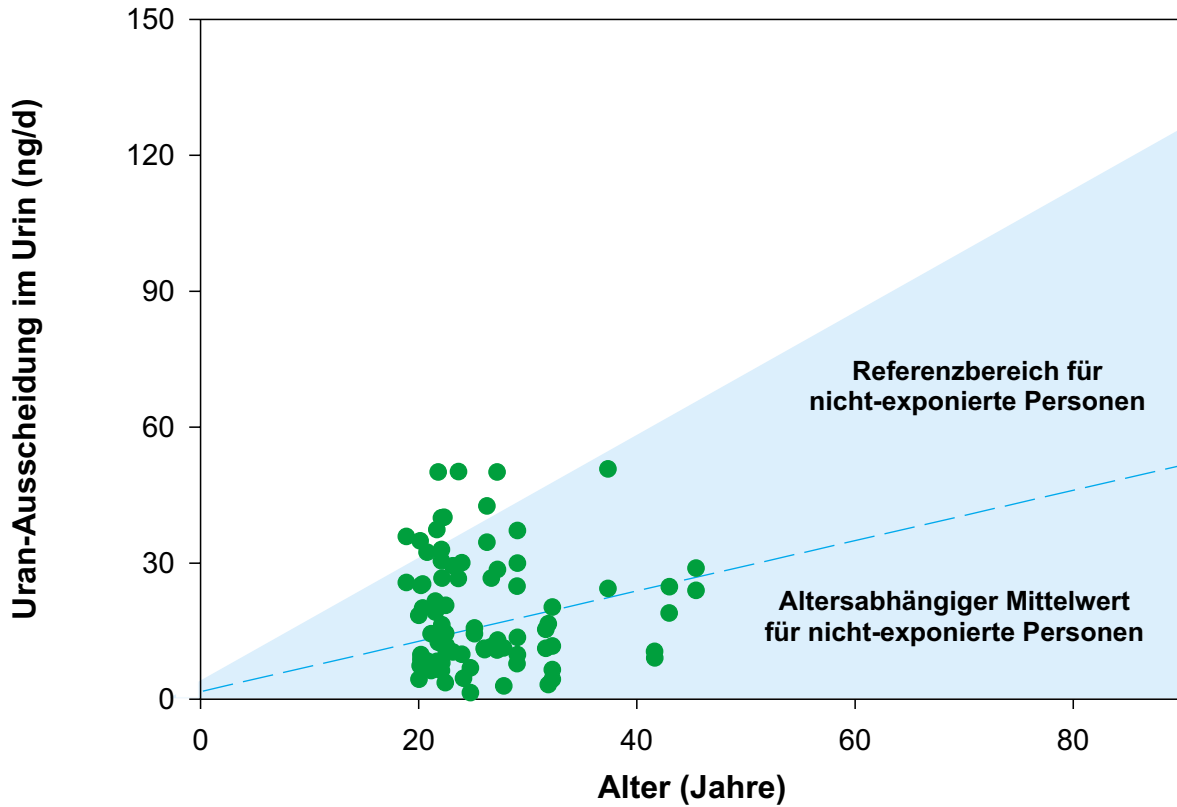


Abb. 5a: Uran-Ausscheidung im Urin bei Studiengruppe 1
(Studiengruppe vor Einsatz; Ergebnisse Einzelmessungen)

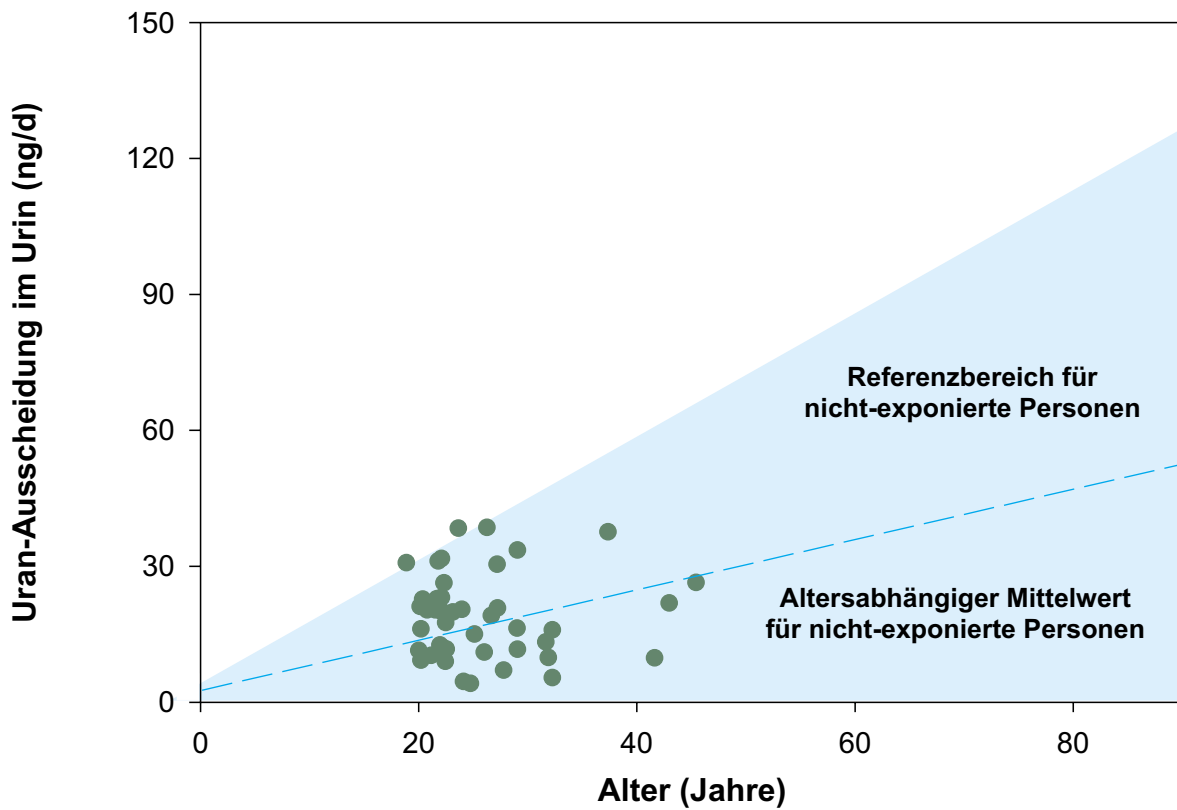


Abb. 5b: Uran-Ausscheidung im Urin bei Studiengruppe 1
(Studiengruppe vor Einsatz; Mittelwert Doppelbestimmungen)

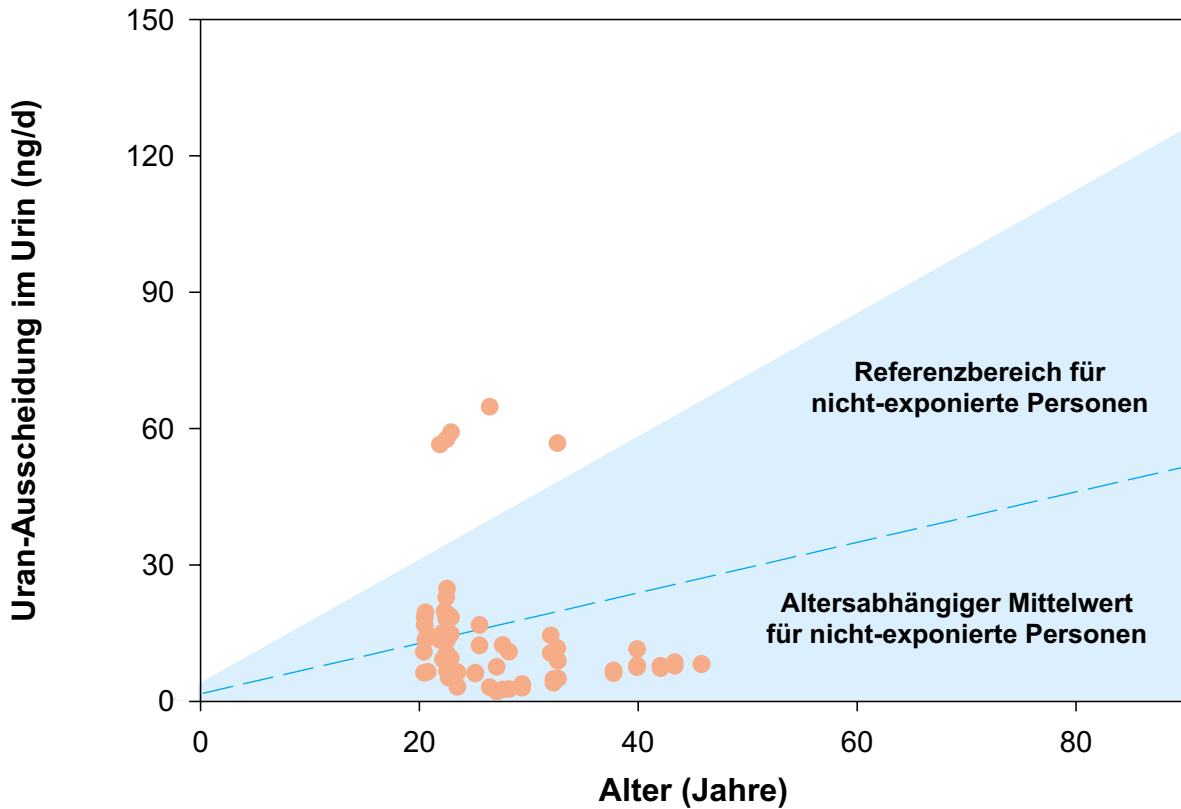


Abb. 6a: Uran-Ausscheidung im Urin bei Studiengruppe 1
(Studiengruppe während Einsatz; Ergebnisse Einzelmessungen)

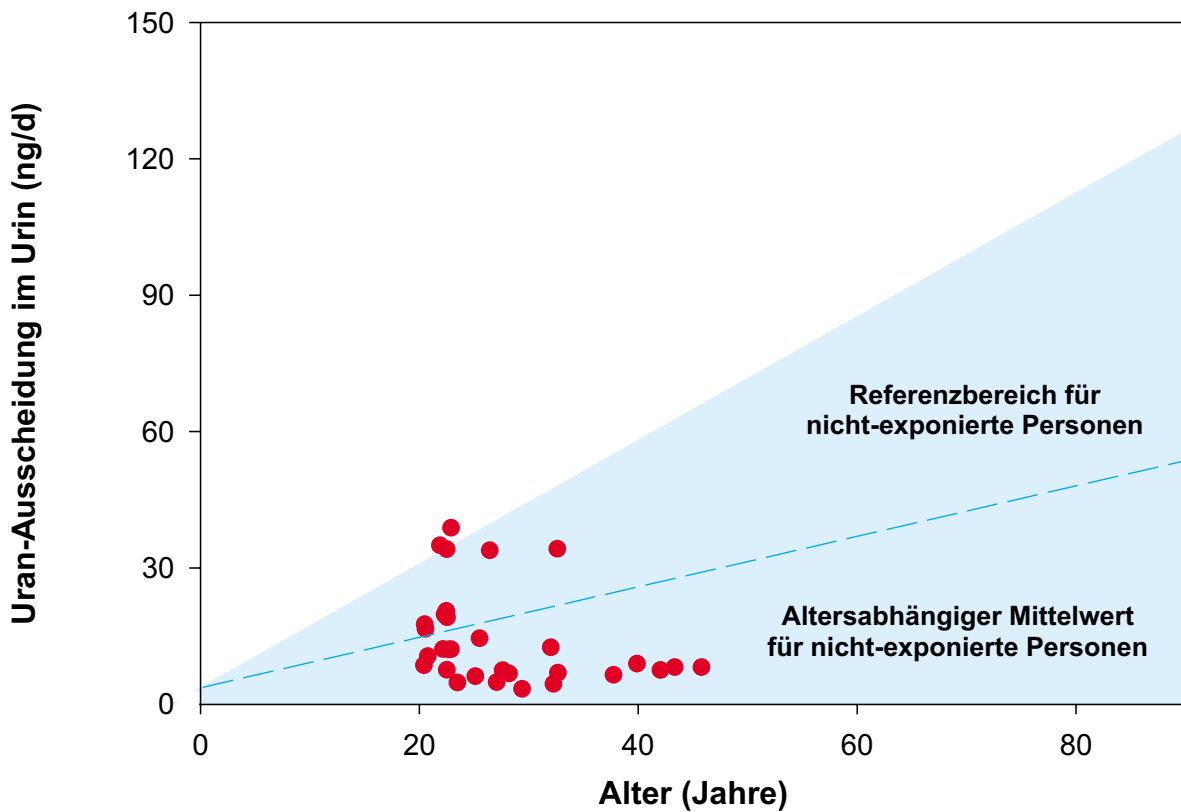


Abb. 6b: Uran-Ausscheidung im Urin bei Studiengruppe 1
(Studiengruppe während Einsatz; Mittelwert Doppelbestimmungen)

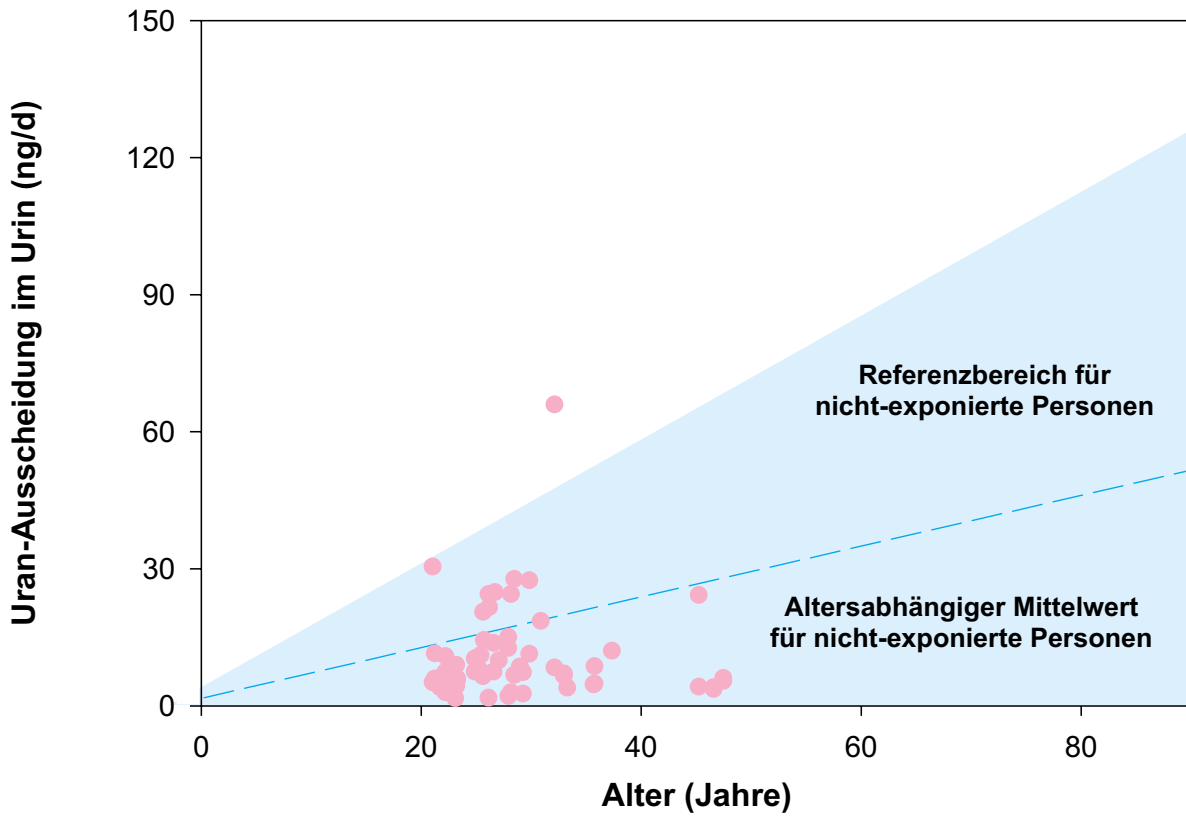


Abb. 7a: Uranausscheidung im Urin bei Studiengruppe 2
(Einzeluntersuchungen während Einsatz; Einzelmessungen)

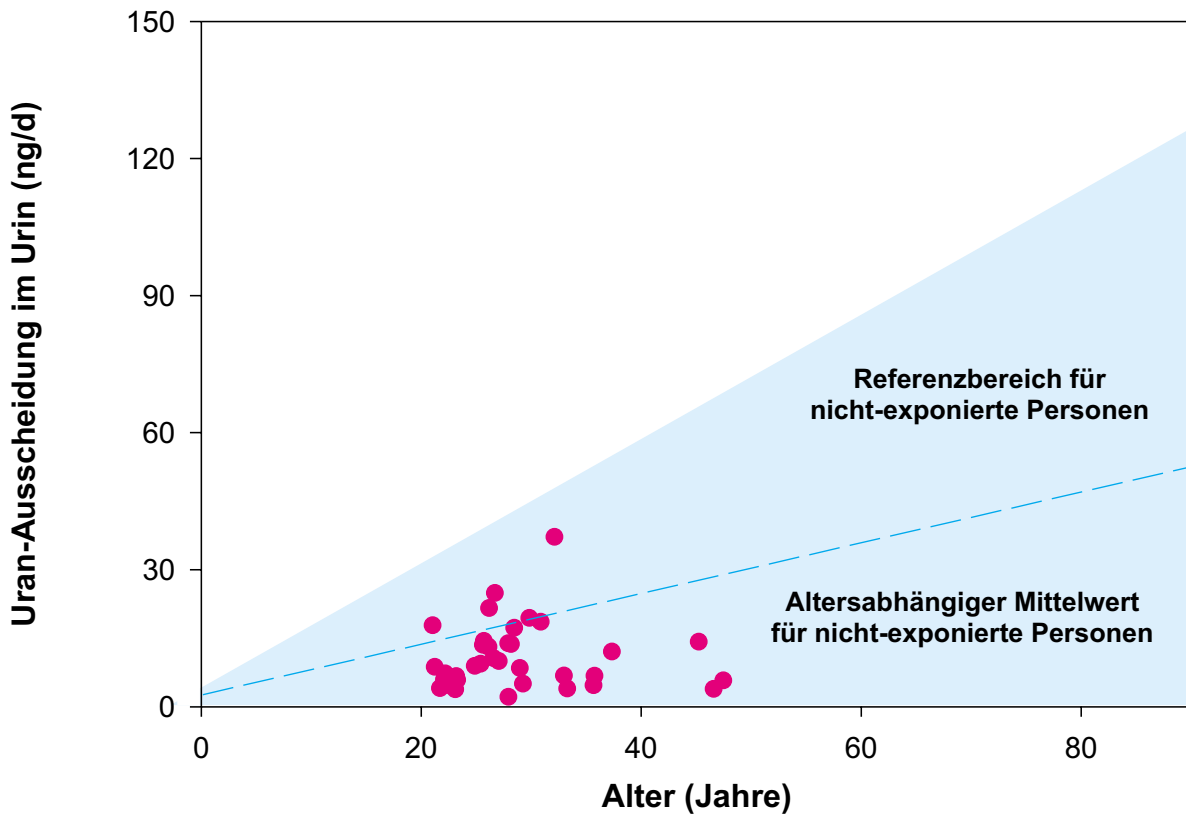


Abb. 7b: Uranausscheidung im Urin bei Studiengruppe 2
(Einzeluntersuchungen während Einsatz;
Mittelwerte aus Doppelbestimmungen)

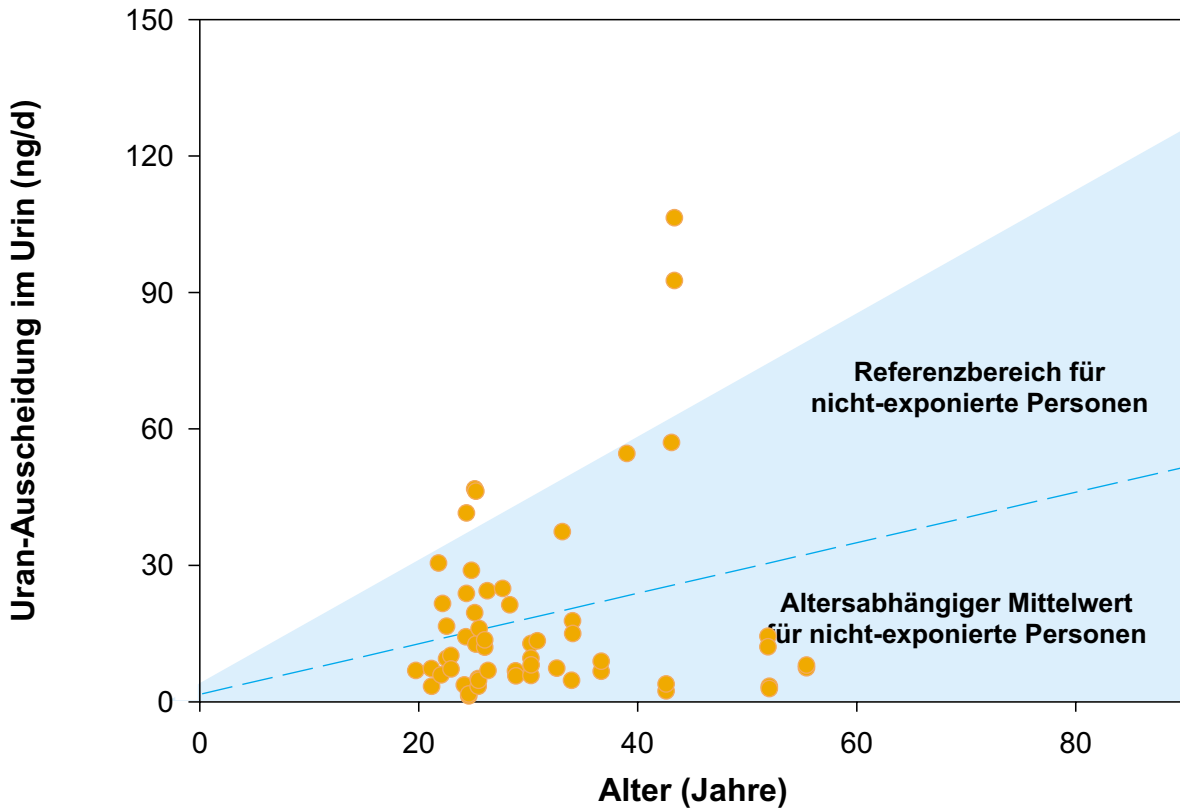


Abb. 8a: Uran-Ausscheidung im Urin bei Studiengruppe 3
(Einzeluntersuchungen nach Einsatz; Ergebnisse Einzelmessungen)

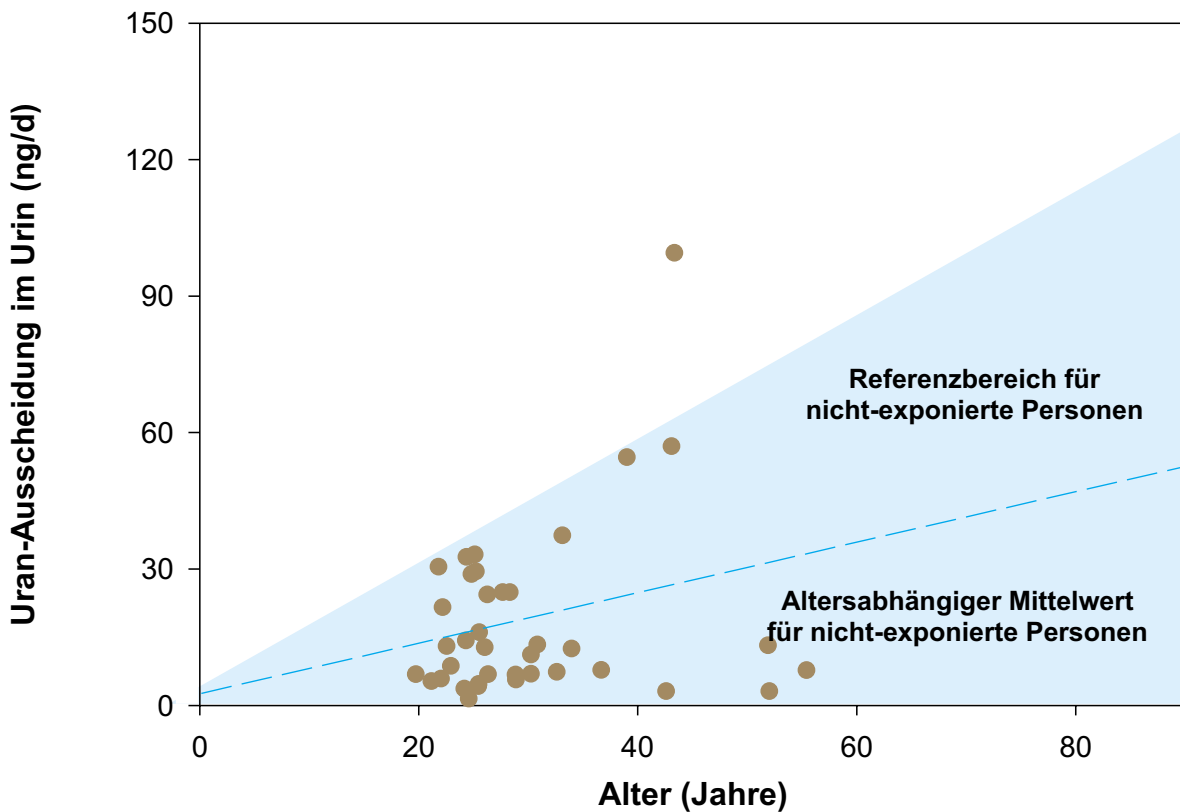


Abb. 8b: Uran-Ausscheidung im Urin bei Studiengruppe 3
(Einzeluntersuchungen nach Einsatz; Mittelwert Doppelbestimmungen)

Die Ergebnisse der Studiengruppe 2 sind entsprechend in **Abbildung 7** graphisch dargestellt. Abbildung 7a zeigt dabei wieder die Werte der Einzelmessungen an, Abbildung 7b die Mittelwerte der Doppelbestimmungen.

Bisher wurden bei 41 Angehörigen aus **früheren** Kontingenten (**Studiengruppe 3**), die sich zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits wieder im Heimatland befanden, Untersuchungen zur Uranausscheidung durchgeführt. Bei 20 Probanden wurden jeweils 2 oder 3 Proben gemessen; für 21 Probanden wurde jeweils nur eine Probe zur Analyse übersandt. Die Untersuchungen an Angehörigen dieser Probandengruppe wurden von den betreuenden Truppenärzten aus den jeweiligen Standorten der Soldaten veranlaßt. Von der GSF wurde das nötige Untersuchungsmaterial zur Verfügung gestellt. Die Urinsammlung wurde an den entsprechenden Standorten durchgeführt, die Proben wurden der GSF i.a. per Post oder per Kurier zugesandt. Für die Ergebnissdarstellung gilt das entsprechende wie für die anderen Probandengruppen: **Abbildung 8a** zeigt die Einzelwerte der individuellen Messungen, **Abbildung 8b** die Mittelwerte aus Mehrfachbestimmungen (soweit durchgeführt).

Aussagefähiger als die Meßergebnisse der Einzeluntersuchungen ist die Analyse der Veränderungen in der Uranausscheidung bei den Probanden der Gruppe 1 (Studiengruppe). Hier fallen die inter-individuellen Schwankungen weg, und es verbleiben nur die interessierenden intra-individuellen Veränderungen. Die Resultate für diese Gruppe sind deshalb in **Abbildung 9** noch einmal gesondert dargestellt. Der linke Teil der Abbildung zeigt die Werte für die Uranausscheidung vor dem Einsatz im Kosovo, der rechte Teil die Werte während des Einsatzes. Die Zugehörigkeit der Probanden zu den beiden Teilgruppen (Einsatzgruppe / Kontrollgruppe) ist dabei durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet. (**rot**: Probanden der Einsatzgruppe; **grün**: Probanden der Kontrollgruppe). Außerdem ist in der Abbildung der Mittelwert und der Referenzbereich für diese Altersgruppe dargestellt. Es ist ersichtlich, daß alle Werte für die Uranausscheidung im Urin für alle Probanden sowohl vor als auch während des Einsatzes innerhalb des Referenzbereichs für nicht-exponierte Personen liegen.

Diese Daten wurden zusätzlich statistisch analysiert. Die entsprechenden statistischen Kenngrößen sind in **Tabelle 5** dargestellt. Der Mittelwert der Uranausscheidung vor Einsatz betrug für die Einsatzgruppe 17,9 ng/d, für die Kontrollgruppe 17,5 ng/d, und war somit für beide Teilgruppen nahezu identisch und entsprach dem Mittelwert für nicht-exponierte Personen dieser Altersgruppe. Im Einsatz ergab sich für die Einsatzgruppe ein Mittelwert von 19,3 ng/d und für die Kontrollgruppe 12,0 ng/d. Die entsprechenden Werte für die gesamte Gruppe waren 17,7 ng/d vor Einsatz und 15,9 ng/d unter Einsatz. Die Änderungen dieser Werte der Kollektive wurden mit einem gepaarten t-Test für Stichproben mit ungleichen Varianzen auf Nullhypothese getestet. Die resultierenden t-Werte und Signifikanzniveaus für den zweiseitigen Test sind in den letzten Spalten von Tabelle 5 aufgelistet. Weder für die Gesamtgruppe noch für eine der beiden Teilgruppen sind die Ausscheidungsraten statistisch signifikant verschieden voneinander, d.h. es wurde **kein** statistisch signifikanter Unterschied festgestellt.

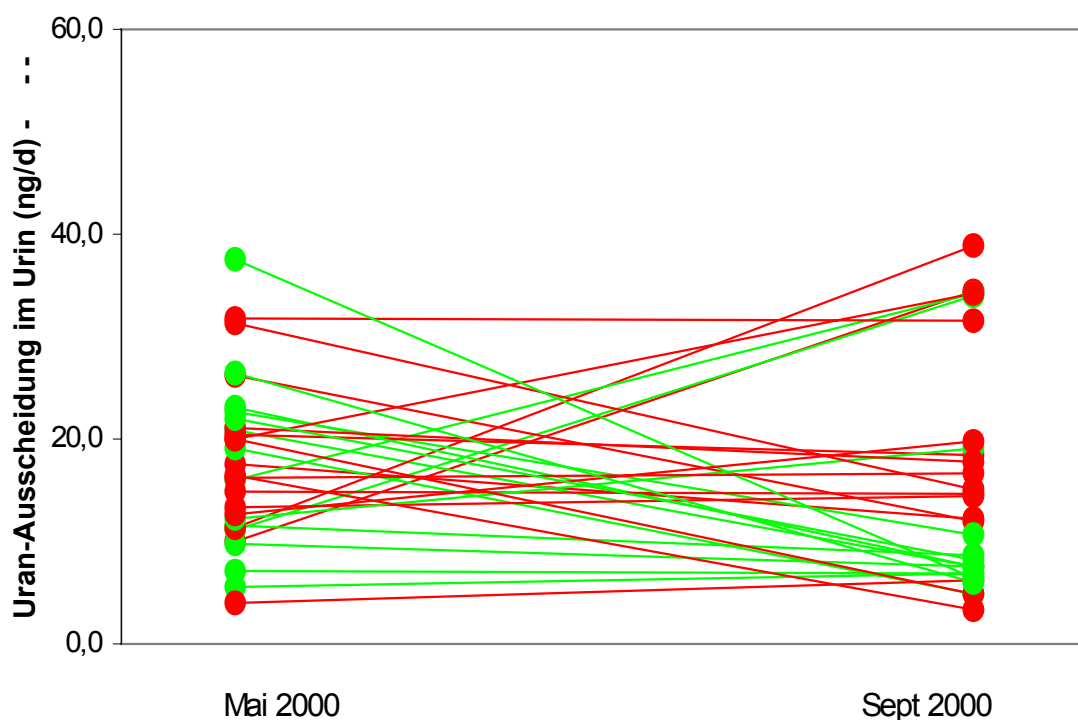


Abb. 9: Veränderungen der Uranausscheidung im Urin bei den Personen der Studiengruppe 1:
Links vor Einsatz – rechts die entsprechenden Werte unter Einsatz.
Rot: Personen der Einsatzgruppe; Grün: Personen der Kontrollgruppe.

Tabelle 5: Statistische Kenngrößen für die Uranausscheidung (ng/d) bei den Probanden der Gruppe 1 (Studiengruppe)

	Mittelwert vor Einsatz	SD vor Einsatz	Mittelwert im Einsatz	SD im Einsatz	t	P ^{*)}
Einsatzgruppe	17,9	7,4	19,3	11,5	0,407	n.s.
Kontrollgruppe	17,5	8,6	12,0	9,9	1,378	n.s.
Gesamt	17,7	7,9	15,9	11,2	0,704	n.s.

^{*)} Signifikanzniveaus (n.s. = nicht signifikant); SD = Statistische Standardabweichung

Die Ergebnisse der Untersuchungen bei den Probanden der Gruppe 3 wurden und werden den betreuenden Truppenärzten des entsprechenden Standorts mitgeteilt, die die Probanden

über das Untersuchungsergebnis informieren. Die Untersuchungsergebnisse für die Probanden der Gruppen 1 und 2 wurden an die Studiengruppe „Biomonitoring“ übergeben, die die Probanden über das Ergebnis informiert.

9. Bewertung der Ergebnisse

Bei den Probanden, bei denen Mehrfach-Bestimmungen durchgeführt wurden, bestätigte sich, daß die Werte der Uranausscheidung bei der gleichen Person erheblich variieren können (s. Tabellen A1–A4). Obwohl in den meisten dieser Fälle die beiden Untersuchungen an aufeinander folgenden Tagen vorgenommen wurden, können in einzelnen Fällen die beiden Meßwerte stark voneinander abweichen. Wie schon unter Abschnitt 2. dargelegt, gehen diese Schwankungen über das durch unterschiedliche Nahrungsaufnahme zu erwartende Maß hinaus. Eine genaue Kenntnis über die zugrunde liegenden Mechanismen gibt es bisher nicht. Bei allen hier untersuchten Probandengruppen kann jedoch ausgeschlossen werden, daß es zwischen den beiden Untersuchungen zu zusätzlichen Uraninkorporationen gekommen sein kann, zumal die Schwankungen sich statistisch verteilt **nach beiden Richtungen** hin zeigen. Durch eine Mittelwertbildung können diese Unsicherheiten reduziert werden.

Wie zu erwarten war, stimmen die Meßwerte der Voruntersuchungen bei der Probandengruppe 1 (Soldaten **vor** Einsatz) mit den Referenzwerten von nicht-exponierten Personen gut überein. **Abb. 5a** zeigt die entsprechenden Werte der Einzelmessungen. Daß einige Meßwerte außerhalb des Referenzbereichs liegen ist zwangsläufig, da eine kontinuierliche Meßwertverteilung bei Normalpersonen vorliegt und ein bestimmter Bruchteil „normaler“ Werte außerhalb dieses Bereichs liegen muß. Eine Verringerung der Gesamtvariation der Meßwerte und eine Korrektur von Ausreißerwerten kann, wie oben beschrieben, durch eine Mittelwertbildung aus Mehrfachbestimmungen erreicht werden. Wie aus **Abb. 5b** deutlich wird, ergibt sich damit eine noch bessere Übereinstimmung mit den Referenzwerten.. Es ist jedoch noch einmal darauf hinzuweisen, daß, wie in Abb.3 verdeutlicht, die Varianz der Ausscheidungswerte für einzelne Personen sehr unterschiedlich sein kann. Die Ergebnisse der Untersuchungen während des Einsatzes bei dieser Studiengruppe zeigt **Abb. 6**, wobei **Abb. 6a** wieder die Ergebnisse der Einzelmessungen und **Abb. 6b** die Mittelwerte aus den Doppelbestimmungen zeigt.

Die Ergebnisse der Uranmessungen bei der Probandengruppe 2 (Soldaten **während** Einsatz) sind in **Abb. 7** dargestellt. Während in **Abb. 7a** die Ergebnisse der Einzelmessungen dargestellt sind, zeigt **Abb. 7b** die Mittelwerte der Doppelbestimmungen. **Bei keiner der untersuchten Personen ergeben diese Messungen einen Hinweis auf eine zusätzliche Inkorporation von DU.**

Bei den Untersuchungen an den Soldaten aus früheren KFOR-Kontingenten (Studiengruppe 3) bestand das Problem einer unterschiedlichen und teilweise mehrerer Monate betragenden Zeitspanne zwischen dem Einsatz im Kosovo und der Durchführung der Messungen. Allerdings wäre zu erwarten, daß bei sehr wesentlichen Inkorporationen von DU, insbesondere

solche von gesundheitsgefährdenden Ausmaßen, auch nach längerer Zeit noch erhöhte Ausscheidungswerte zu erwarten wären.

Die bei dieser Probandengruppe ermittelten Ergebnisse sind graphisch in **Abb. 8a** und **Abb. 8b** dargestellt. **Es ist offensichtlich, daß sich für keinen der untersuchten Probanden ein Hinweis auf eine Inkorporation von DU findet.** Da nur bei 14 der 34 untersuchten Probanden Mehrfachbestimmungen durchgeführt wurden, wäre die Reduktion der Varianz durch Mittelwertbildung eigentlich noch größer, als es in Abb. 8b ohnehin deutlich wird. Der einzige etwas höherer Wert konnte auf den Mineralwasserkonsum des entsprechenden Soldaten zurückgeführt werden.

Für den rein hypothetischen Fall, daß man die gesamte nach etwa 30 Tagen gemessene Uranausscheidung im Urin einer Inhalation von schwerlöslichen Uranteilchen zuschreiben würde, ergäbe sich bei einem Meßwert von 30 ng/d, wie er dem oberen Grenzwert bei Personen dieser Altersgruppe entspricht, eine effektiven Folgedosis (d.h. in den nächsten 50 Jahren) von etwa 2 mSv. In der bisher verstrichenen Zeit von etwa einem Jahr, ergäbe sich eine Dosis von etwa 0,4 mSv. Im Vergleich zur lebenslangen natürlichen Strahlenexposition von ca 2,4 mSv pro Jahr, kann eine solche Dosis als gering bezeichnet werden. Ein Zusammenhang zwischen einer solchen Dosis und dem Auftreten von bösartigen Erkrankungen, ist mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit auszuschließen.

Entsprechende Schlussfolgerungen können auch auf dem umgekehrten Weg gezogen werden. So würde eine zusätzliche Dosis von 1 mSv (dem gegenwärtigen jährlichen Dosisgrenzwert für Personen der Allgemeinbevölkerung) durch Inkorporation von DU die in Tabelle 6 angegebenen Zufuhrwerte bedingen. Diese Zufuhren wiederum würden nach 1d, 30d bzw. 180d zu den in Tabelle 6 angegebenen Ausscheidungswerten im Urin führen. Beispielfhaft würde eine Dosis von 1 mSv eine akute Ingestion von rund 22000 Bq ^{238}U bedingen, bzw. eine akute Inhalation von 125 Bq einer schwerlöslichen ^{238}U -Verbindung.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die bisherigen Untersuchungen auf Uranausscheidung im Urin bei keinem der untersuchten Probanden einen Hinweis auf eine Inkorporation von DU ergeben.

Tabelle 6: Zufuhren von ^{238}U , die zu einer zusätzlichen Strahlendosis von 1 mSv führen würden, sowie die aufgrund dieser Zufuhren zu erwartenden täglichen ^{238}U -Ausscheidungen im Urin

Zufuhrpfad	Zufuhr (Bq ^{238}U)	^{238}U -Ausscheidung im Urin / Tag		
		1 d	30 d	180 d
Inhalation (akut; AMAD=1 μm)				
Löslichkeitstyp F (<i>Fast</i>)	2000	360 Bq (= 28,9 mg)	1,4 Bq (= 0,11 mg)	62 mBq (= 5,0 μg)
Löslichkeitstyp M (<i>Moderate</i>)	345	7,9 Bq (= 0,64 mg)	93 mBq (= 7,5 μg)	22 mBq (= 1,8 μg)
Löslichkeitstyp S (<i>Slow</i>)	125	17 mBq (= 1,4 μg)	0,19 mBq (= 15 ng)	83 μBq (= 7 ng)
Ingestion (akut; $f_1 = 0,02$)	22222	289 Bq (= 23,2 mg)	1,1 Bq (= 86 μg)	0,49 Bq (= 39 μg)
Direktaufnahme ins Blut	500	325 Bq (= 26,1 mg)	1,1 Bq (= 96 μg)	55 mBq (= 4,4 μg)

10. Zusammenfassung

Es wurde untersucht, ob für Soldaten des DtHKtgt KFOR mit ihrem Aufenthalt und ihrer Tätigkeit im Kosovo eine mögliche Gesundheitsgefährdung durch die Inkorporation von abgereichertem Uran (DU) verbunden ist. Dazu wurden Messungen zur Uranausscheidung im Urin durchgeführt, und die Ergebnisse mit Referenzwerten von nicht-exponierten Personen verglichen. Die angewandte Meßmethode ist die hochauflösende ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry*).

Umfangreiche Messungen an einem großen Kollektiv von nicht-exponierten Personen bieten eine verlässliche Basis zur Beurteilung individueller Meßwerte.

Die Messungen der Uran-Ausscheidung wurden bei Angehörigen aus früheren und gegenwärtigen Kontingenten durchgeführt. Bei einer ausgewählten Studiengruppe von etwa 50 Soldaten werden diese Messungen vor ihrem Einsatz sowie etwa 2 Monate nach Beginn ihres Einsatzes durchgeführt.

Bisher wurden 122 Probanden untersucht (43 Personen aus der Studiengruppe, 38 Personen während ihres Einsatzes, 41 Personen aus früheren Kontingenten). In der Mehrzahl der Fälle wurden dabei Mehrfachbestimmungen (meist an aufeinander folgenden Tagen) durchgeführt.

Die bisher erhobenen Werte der Uran-Ausscheidung im Urin zeigen, daß es bei keinem der bisher untersuchten Probanden einen Hinweis auf eine Inkorporation von DU ergibt.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Herrn Prof. P. Schramel und seinen Mitarbeitern vom GSF – Institut für Ökologische Chemie für die hervorragenden Spurenelementanalysen.

11. Literatur

- [1] Fisenne, I.M., Perry, P.M., Harley, N.H.: **Uranium in Humans.** *Rad Prot Dosimetry.* 24, 127-131 (1988)
- [2] Fisenne, I.M., Perry, P.M., Decker, K.M., Keller, H.K.: **The Daily Intake of $^{234,235,238}\text{U}$, $^{228,230,232}\text{Th}$, and $^{226,228}\text{Ra}$ by New York City Residents.** *Health Phys.* 53, 357-363 (1987)
- [3] Werner, E., Roth, P. Heinrichs U., Schramel, P., Wendler, I., Mc Aughey, J., Hearn, R., Cantone, M.C.*: **Uranium concentration in tap water and urine of unexposed subjects in Britain, Italy and Germany.** *IRPA Regional Congress on Radiation Protection in Central Europe.* Budapest, 23. - 27.08.99 (1999)
- [4] Harley, J.H.: **Naturally Occuring Sources of Radioactive Contamination. Radionuclides in the Food Chain.** In: M.W. Carter, ed., *International Life Sciences Institute Monographs*, Heidelberg: Springer-Verlag, 58-71 (1988)
- [5] Taylor, D.M., Taylor, S.K.: **Environmental Uranium and Human Health.** *Rev. Environm. Health.* 12, 147-157 (1997)
- [6] International Commission on Radiological Protection. **Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 3 – Ingestion dose coefficients.** *ICRP Publication 69, Annals of the ICRP, Vol 25, No.1, Pergamon Press, London* (1995)
- [7] International Commission on Radiological Protection. **Human respiratoria tract model for radiological protection.** *ICRP Publication 66, Annals of the ICRP, Vol 24, No.1-3* , Pergamon Press, London (1994)
- [8] International Commission on Radiological Protection. **Individual monitoring for internal exposure of workers (Replacement of ICRP Publication 54).** Oxford: Elsevier Science Ltd.: *ICRP Publication 78, Annals of the ICRP, Vol 27, No.3-4* , Pergamon Press, London (1997)
- [9] Cooper, J.R., Stradling, G.N., Smith, H., Ham, G.E.: **The behaviour of uranium-233 oxide and uranyl-233 nitrate in rats.** *Int. J. Radiat. Biol.* 41, 421-433 (1982)
- [10] Stevens, W., Bruenger, F.W., Atherton, D.R., Smith, J.M., Taylor, G.N.: **The distribution and retention of hexavalent ^{233}U in the beagle.** *Rad. Research.* 83, 109-126 (1980)
- [11] Bowman, F.J., Foulkes, E.C.: **Effects of Uranium on Rabbit Renal Tubules.** *Toxicology and Applied Pharmacology.* 16, 391-399 (1970)

- [12] Richtlinie 96/29 EURATOM des Rates vom 13. Mai 1996, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 159, 39. Jahrgang, 29. Juni 1996, ISSN 0376-9453, (1996)
- [13] International Commission on Radiological Protection. **Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1 – Ingestion dose coefficients.** *ICRP Publication 56, Annals of the ICRP, Vol xx, No.y*, Pergamon Press, London (1990)
- [14] International Commission on Radiological Protection. **Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2 – Ingestion dose coefficients.** *ICRP Publication 67, Annals of the ICRP, Vol 23, No.3-4*, Pergamon Press, London (1993)
- [15] International Commission on Radiological Protection. **Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4 – Inhalation dose coefficients.** *ICRP Publication 71, Annals of the ICRP, Vol 25, No.3-4*, Pergamon Press, London (1995)
- [16] International Commission on Radiological Protection. **Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 5 – Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients.** *ICRP Publication 72, Annals of the ICRP, Vol 26, No.1*, Pergamon Press, London (1996)
- [17] International Commission on Radiological Protection. **1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.** *ICRP Publication 60, Annals of the ICRP, Vol 21, No.1-3*, Pergamon Press, London (1991)
- [18] Werner, E., Roth, P., Wendler, I., Schramel, P.: **Abhängigkeit der renalen Thorium- und Uranausscheidung von Geschlecht und Alter bei nicht-exponierten Personen.** In: *Radioaktivität in Mensch und Umwelt.* (Hrsg. M. Winter, K. Henrichs, H. Doerfel). Köln: TÜV-Verlag, 182-187 (1998)
- [19] Werner, E.: **Renal thorium and uranium excretion in non-exposed subjects.** In: *Radiation Protection in Neighbouring Countries of Central Europe.* (Hrsg. J. Sabol). Prag: Tschechische Technische Universität, 325-327 (1997)
- [20] Werner, E., Roth, P., Wendler, I., Schramel, P.: **Messungen der renalen Uran- und Thoriumexkretion bei nicht-exponierten Personen mittels ICP-MS.** In: *Proceedings of CANAS 97.* (Hrsg. C. Vogt, R. Wenrich, G. Werner) Leipzig: Universität Leipzig, 263-266 (1998)
- [21] International Commission on Radiological Protection. **Report of the Task Group on Reference Man.** *ICRP Publication 23, Annals of the ICRP, Vol xx, No.x*, Pergamon Press, London (1975)

- [22] Dang, H.S., Pullat, V.R., Pillai, K.C.: **Determining the normal concentration of uranium in urine and application of the data to its biokinetics.** *Health Phys.* 62, 562-566 (1992)
- [23] Schramel, P., Wendler, I., Roth, P., Werner, E.: **A method for the determination of Thorium and Uranium in urine samples by ICP-MS.** *Mikrochim. Acta* 126, 263-266 (1997)
- [24] Werner, E., Roth, P., Wendler, I., Schramel, P., Hellmann, H.*, Kratzel, U.*: **Feasibility of ICP-MS for the assessment of uranium excretion in urine.** *J. Radioan. Nucl. Chem.* 226, 201-203 (1997)